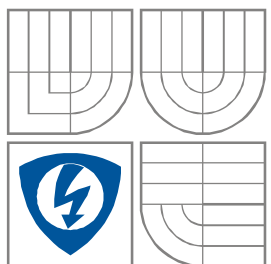


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

NÁVRH A ANALÝZA TROJFÁZOVÉHO SYNCHRÓNNEHO ALTERNÁTORU

DESIGN AND ANALYSIS OF THREE-PHASE SYNCHRONOUS GENERATOR

BAKALARÁSKA PRÁCA
BACHELOR'S THESIS

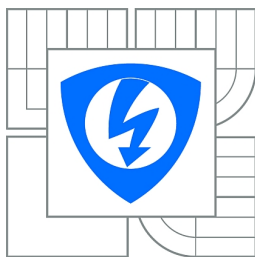
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ondrej Šulák

VEDÚCI PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

BRNO, 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoprúdová elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Ondrej Šulák

ID: 106827

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a analýza třífázového synchronního alternátoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište konstrukci a princip funkce synchronních strojů.
2. Nastudujte problematiku výpočtu elektromagnetických polí metodou konečných prvků (MKP) v programu FEMM.
3. Provedte analytický výpočet synchronního alternátoru zadaných parametrů.
4. Výpočet ověřte pomocí metody konečných prvků, zhodnoťte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 23.9.2010

Termín odevzdání: 30.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Moja práca vás oboznámi nielen s problematikou magnetického poľa, ale taktiež s konštrukčnými komplikáciami a ich riešeniami pri návrhu elektrického stroja.

V úvodnej kapitole sa snažím podať čo najvýstižnejšie teóriu magnetických polí, pretože porozumieť týmto fyzikálnym dejom je pri návrhu stroja našou alfou a omegou. Vzhľadom na to, že magnetizmus je v dnešnej dobe stále takou alchémiou. V druhej kapitole sa venujem analýze a návrhu konštrukcií stroja, rotor, stator, ako navrhnuť vinutia, budiaci prúd a taktiež znázorním výsledky z programu FEMM, kde som simuloval daný synchronný stroj. Výsledky z programu som overil výpočtami.

Abstract

My work will not inform you only about the issue of magnetic field, but also with the design complications and their solutions in the design of electrical machine.

In the introductory chapter, I tried to give the most accurate theory of magnetic fields, because to understand that episodes of physical design of the machine is our alpha and omega. Given that the magnetism is nowadays still such alchemioui. The second chapter deals with analysis and design of construction machinery, rotor, stator, as proposed winding, current drive and also shows the results of the FEMM, where I simulate the synchronous machine. Results of the calculations in FEMM, I have recalculate for my own.

Kľúčové slová

Synchrónny alternátor, striedavý stroj.

Keywords

Synchronous alternator, ac machine.

Bibliografická citácia

ŠULÁK Ondrej: *Návrh a analýza trojfázového synchronného alternátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 35 s.
Vedúci bakalárskej práce Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému **Návrh a analýza trojfázového synchronného alternátoru** som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, ani som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomí následkov porušenia ustanovení § 11 a následne autorského zákona č. 121/2000 Zb., včítane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Zb.

V Brne dňa

Podpis autora

PodĎakovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce - Ing. Ondřejovi Vítekovi, Ph.D.- za účinnú metódickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovávaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa

Podpis autora

Obsah

1 ÚVOD	10
1.1 ROZDELENIE ELEKTRICKÝCH STROJOV.....	10
1.2 INDUKOVANÁ ELEKTROMOTORICKÁ SILA ZMENOU MAGNETICKÉHO OBVODU.....	10
1.3 MAGNETICKÝ OBVOD ELEKTRICKÉHO STROJA - MAGNETOMOTORICKÁ SILA	11
1.3.1 MAGNETOMOTORICKÁ SILA (MMS).....	11
1.4 POSTUP PRI RIEŠENÍ MAGNETICKÝCH OBVODOV	12
1.5 METÓDA KONEČNÝCH PRVKOV	13
2 SYNCHRÓNNE STROJE	14
2.1 KONŠTRUKCIA.....	14
2.1.1 VINUTIE STATORU.....	14
2.2 MAGNETICKÉ POLE STROJA A JEHO VÝPOČET	17
2.3 BUDENIE SYNCHRÓNNEHO STROJA.....	20
2.4 ROTOR A STATOR.....	20
2.4.1 STATOR STROJA	20
2.4.2 ROTOR STROJA	25
3 PRINCÍP A NÁHRADNÁ SCHÉMA.....	26
4 STRATY STROJA.....	30
4.1 STRATY VO VINUTÍ.....	30
4.2 STRATY V ŽELEZE	31
4.3 MECHANICKÉ STRATY	31
4.4 ÚČINNOSŤ STROJA	31
5 ZÁVER.....	33
LITERATÚRA	34

ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obrázok 1: Zmena magnetického toku, spráženého so závitom pri relatívnom pohybe závitov v magnetickom poli;[3].....</i>	<i>11</i>
<i>Obrázok 2: Krivka MMS vinutia, tvorená q cievkami v sérii a uloženého v q drážkach[3]</i>	<i>12</i>
<i>Obrázok 3: Magnetický obvod stroja s vyniklými pólmi[3]</i>	<i>13</i>
<i>Obrázok 4: Vektorová hviezda jednovrstvového vinutia s plným krokom.....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázok 5: Vektorová hviezda dvojrstvového vinutia $\alpha_e=20^\circ$</i>	<i>15</i>
<i>Obrázok 6: Magnetická indukcia vo vzduchovej medzere</i>	<i>17</i>
<i>Obrázok 7: Magnetický tok prechádzajúci strojom</i>	<i>18</i>
<i>Obrázok 8 Konštrukčné schéma statora.....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázok 9 Napätie indukované v jednom závite ($y=7$)</i>	<i>21</i>
<i>Obrázok 10: Ukážka vinutia kotvy pre fázu U($y=7$)</i>	<i>21</i>
<i>Obrázok 11: Schéma zapojenia vinutí statoru(čierna U;zelená W;modrá V).....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázok 12: Sprážený magnetický tok vinutím statora.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázok 13: Priebehy indukovaných napätí</i>	<i>23</i>
<i>Obrázok 14: Priebeh indukovaného napätia v cievkach prvého návrhu stroja</i>	<i>23</i>
<i>Obrázok 15 Konštrukčné schéma rotora.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázok 16: Magnetické pole v drážkach rotorového vinutia</i>	<i>26</i>
<i>Obrázok 17: Orientácia fázorov a vektorov MMS statoru a rotoru.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázok 18: Náhradná schéma synchronného stroja s hladkým rotorom.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázok 19: Fázorový diagram alternátora s hladkým rotorom (modrá $\cos\varphi =0,8(kap.)$;červená $\cos\varphi=0,5(kap.)$)</i>	<i>28</i>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Značka	Názov veličiny	Jednotka
ΔP_{Fe}	Straty v železe	W
B	Indukcia	T
b_3	Šírka drážky	m
B_p	Indukcia v póle	T
B_z	Indukcia v zube	T
b_z	Šírka zubu	m
$B_{\delta u}$	Stredná hodnota indukcie vo vzduchovej medzere pre 90°	T
D	priemer	m
D	Priemer stroja vo vzduchovej medzere	m
e	Elektromotorická sila	V
F	Magnetomotorická sila	A
F_{md}	MMS drážky	A
H	Intenzita magnetického pola	A.m ⁻¹
H_{jr}	Intenzita magnetického pola jhu rotora	A.m ⁻¹
H_{js}	Intenzita magnetického pola jhu statora	A.m ⁻¹
H_z	Intenzita magnetického pola zubu	A.m ⁻¹
I	Jednosmerný prúd alebo efektívna hodnota striedavého prúdu	A
I_n	Nominálny prúd	A
J	Prúdová hustota	A.m ⁻²
k_c	Carterov činiteľ	-
L	Dĺžka železa	m
l_{jr}	Dĺžka siločiar v jhu rotora	m
l_{js}	Dĺžka siločiar v jhu statora	m
l_{r2}	Dĺžka vinutia budiaceho vinutia	m
l_{s1}	Dĺžka vinutia jednej fáze statora	m
l_z	Dĺžka zubu	m
N	Počet závitov	
P_{Cu}	Celkové straty v medi	W

R	Odpor vinutia	Ω
S	Prierez, plocha	m^2
S_{cu}	Plocha prierezu medi	m^2
S_{p30}	Plocha pólového krytia	m^2
U	Magnetické napätie, napätie svoriek statora	A
U_{jr}	Magnetické napätie jhu rotora	A
U_{js}	Magnetické napätie jhu statora	A
U_n	Nominálne napätie	V
U_p	Magnetické napätie pólu	A
U_z	Magnetické napätie zubu	A
U_δ	Magnetické napätie vzduchovej medzere	A
X_d	Celková reaktancia stroja	Ω
X_n	Pozdĺžna reaktancia statoru	Ω
X_r	Rozptylová reaktancia statoru	Ω
α	Mechanický uhol	°
α_e	Elektrický uhol	°
δ	Vzduchová medzera	mm
δ'	Náhradná vzduchová medzera	mm
σ	Prúdová hustota	$A.m^{-2}$
γ	Váha ocele	$Kg.m^{-3}$

1 ÚVOD

1.1 Rozdelenie elektrických strojov

Pod pojmom elektrický stroj si môžeme predstaviť zariadenie, ktoré dokáže premeniť mechanickú energiu na elektrickú a naopak. Vzhľadom na fyzikálne deje (elektromagnetická indukcia), ktoré v stroji prebiehajú ho môžeme nazvať elektromagnetickým zariadením. Táto skupina zahŕňa točivé stroje ale aj transformátory.

Podľa funkcie členíme stroje na:

- a) Motory - elektrická energia sa mení na mechanickú (točivý moment)
- b) Generátory – mechanická energia sa mení na elektrickú (indukované napätie na cievkach statora)
- c) Meniče – mení kmitočty a priebehy veličín

Toto rozdelenie nie je až tak výstižné z principiálneho hľadiska, pretože každý stroj môže pracovať ako motor a generátor.

Stroje delíme z konštrukčného hľadiska na:

- 1) Transformátory
- 2) Asynchrónne stroje
- 3) Synchronné stroje
- 4) Jednosmerný stroj
- 5) Striedavý stroj s komutátorom

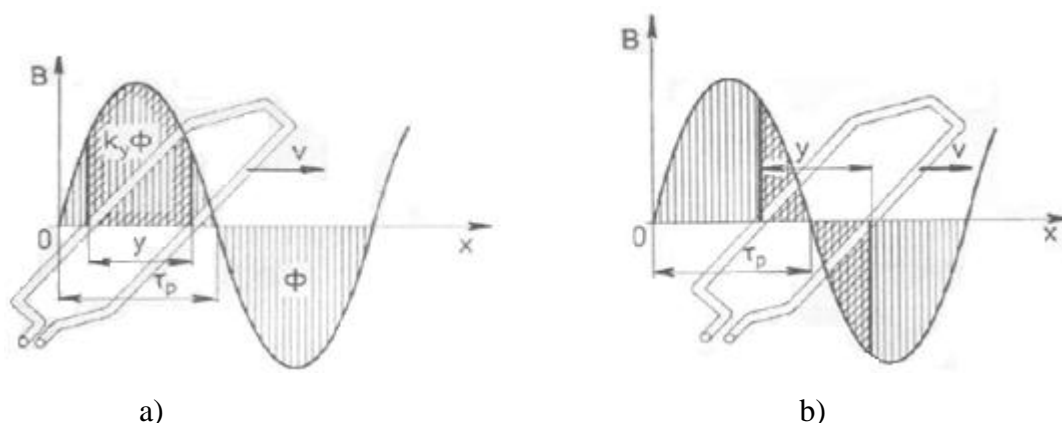
Používajú sa prevažne pre výrobu elektrickej energie. Synchronný generátor (SG) sa taktiež nazýva alternátor. Nevýhodou synchronných motorov je, že sa nerozbehnú z kludnej polohy samé.

1.2 Indukovaná elektromotorická sila zmenou magnetického obvodu

Základom pôsobenia všetkých elektromagnetických strojov je indukcia elektromotorickej sily daná zmenou magnetického pola, ktorej základným zákonom je

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Slovne znamená: zmenou magnetického pola prechádzajúceho uzavretým elektrickým obvodom sa v tomto obvode indukuje elektromotorická sila rovná zmene toku s časom. Zmena magnetického pola môže byť časová, alebo priestorová. Priestorovou zmenou magnetického toku sa indukuje elektromotorická sila v točivých strojoch [1].



Obrázok 1: Zmena magnetického toku, spráženého so závitom pri relatívnom pohybe závitov v magnetickom poli;[3]

a) poloha závitov, keď je mag. sprážený tok so závitom maximálny – $k_y \Phi$,

b) poloha závitov, keď je mag. sprážený tok so závitom je minimálny – 0.

1.3 Magnetický obvod elektrického stroja - magnetomotorická sila

Magnetický obvod (MO) je cesta, ktorá je myslená ako uzavretý magnetický tok elektrickým strojom. MO môže byť jednoduchý alebo zložený, závisí to na prierezoch, materiáloch danej vodivosti a popríklad na rozvetvení ciest. MO budíme budiacou cievkou alebo permanentným magnetom. Rozptylový tok je nevyužitý ϕ , ktorý ide mimo MO. Pri výpočte magnetického obvodu určujeme magnetomotorickú silu potrebnú pre vybudenie takého magnetického toku v stroji, ktorý bude vo vinutí statoru indukovať potrebnú elektromotorickú silu.

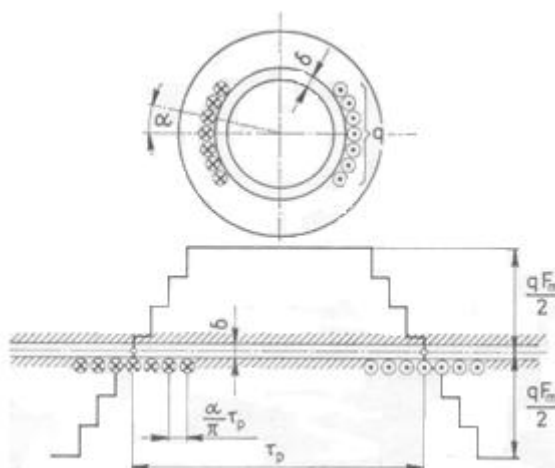
1.3.1 Magnetomotorická sila (MMS)

Budiacimi cievkami dostaneme ϕ stroja, ktorý prechádza cez pól statoru \rightarrow vzduchovú medzeru \rightarrow rotora \rightarrow druhá vzduchová medzera \rightarrow druhý pól statoru \rightarrow zakončuje sa statorovým jhom. ϕ závisí na magnetomotorickej sile F_m a magnetickej vodivosti Λ magnetického obvodu. Túto závislosť poznáme ako Hopkinsonov zákon, ktorý je obdobou Ohmovho zákona.

$$\Phi = F_m \cdot \Lambda \quad (2)$$

MMS je vytvorená prechádzajúcim prúdom cievky I cez N závitov, pomedzi ktorými tečie sprážený magnetický tok.

$$F_m = \Sigma I = N \cdot I \quad (3)$$



Obrázok 2: Krivka MMS vinutia, tvorená q cievkami v sérii a uloženého v q drážkach[3]

Magnetická vodivosť Λ MO je úmerná magnetickej vodivosti (permeabilita) μ a stálego prierezu S na dĺžke l .

$$\Lambda = \mu \cdot \frac{S}{l} \quad (4)$$

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (5)$$

1.4 Postup pri riešení magnetických obvodov

Treba si uvedomiť, že magnetický tok sa uzaviera v každom prostredí, takže vodivosť prostredia je daná vzorčekom (5), buď je lepšia alebo horšia magnetická vodivosť. Pri návrhu treba dbať na sýtenie magnetických materiálov, pretože feromagnetické látky majú $\mu_r \neq \text{konst.}$. Preto pri návrhu musíme zohľadniť magnetizačné krivky a použitý materiál. V praxi sa stretneme s jednoduchým a zloženým magnetickým obvodom.

„MO se pro výpočet dělí na části, v nichž lze po celé délce l předpokládat stálý průřez S . Pro vzduch a všechny neferomagnetické látky je permeabilita stálá a rovná permeabilitě vakua, čili $\mu_r=1$. Pro části se stálou permeabilitou rovnou permeabilitě vzduchu je magnetické napětí

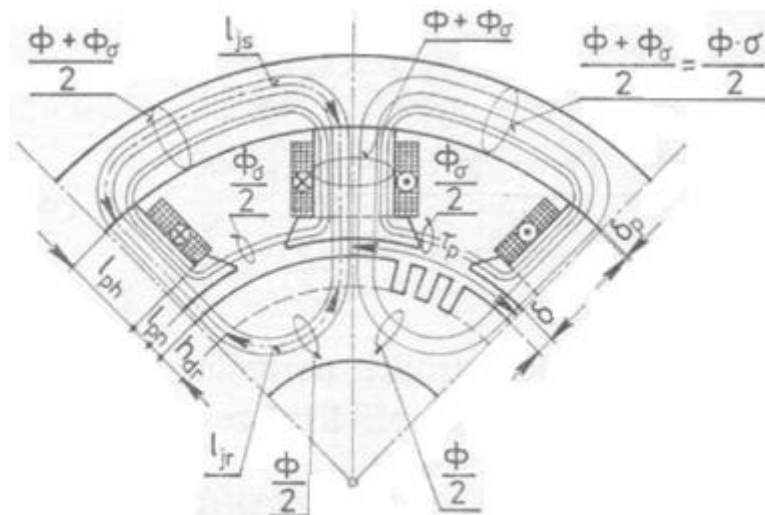
$$U_m = \frac{\Phi}{\Lambda} = \frac{\Phi \cdot l}{\mu_0 \cdot S} = 0,8 \cdot 10^6 B l \quad (6)$$

Pro feromagnetické části se místo permeability čte přímo intenzita magnetického pole

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (7)$$

v závislosti na indukci B z magnetizační čáry. Magnetické napětí pro část se stálou intenzitou magnetického pole je”(Cigánek, 1958, s. 240)

$$U_m = \frac{\Phi}{\Lambda} = \frac{B \cdot l}{\mu} = H \cdot l \quad (8)$$



Obrázok 3: Magnetický obvod stroja s vyniklými pólmi[3]

Priebeh magnetického poľa pod pólom je daný profilom pólového nástavca. Pólový nástavec s konštantnou vzduchovou medzerou nám dáva lichobežníkové/obdĺžnikové pole. My sa snažíme, aby bolo pole vo vzduchovej medzere priestorovo sínusové, čo by spôsobilo sínusový priebeh elektromotorickej sily v cievkach vinutia za predpokladu, že indukčné čiary prechádzajú radiálne z rotoru do statoru.

1.5 Metóda konečných prvkov

“Je to numerická metóda sloužící k simulaci průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, tvaru siločar... na vytvořeném fyzikálním modelu. Její princip spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. Metóda konečných prvků je užívána především pro kontrolu již navržených zařízení, nebo pro stanovení kritického (nejnamáhanějšího) místa konstrukce. Ačkoliv jsou principy této metody známy již delší dobu, k jejímu masovému využití došlo teprve s nástupem moderní výpočetní techniky. Stěžejním problémem při určování elektrodynamických sil je výpočet elektromagnetického pole. Analyticky se tento úkol provádí velmi obtížně. Základním matematickým aparátom jsou i v tomto případě Maxwellovy rovnice, jejichž řešení však probíhá numericky pomocí výpočetní techniky. Výsledkem řešení není jen jedna hodnota fyzikální veličiny (elektromagnetická indukce, intenzita), ale rozložení elektromagnetického pole na celé oblasti modelu. Tím lze získat mnohem ucelenější představu, a odhalit jinak skryté souvislosti.”(Michailidis ,2010, s.9)

2 SYNCHRÓNNE STROJE

2.1 Konštrukcia

Trojfázový alternátor sa skladá zo statoru, ktorý má trojfázové vinutie, a z rotoru, ktorý tvoria polové dvojice a budiace vinutie umiestnené v drážkach. Rotor môže byť dvojpólový, štvorpólový alebo viac pólový. Ak je rotor dvojpólový (pólová dvojica $p=1$), tak alternátor má 3000ot/min, aby striedavé napätie malo frekvenciu $f=50\text{Hz}$. Hladký rotor je častejšie používaný pri turboalternátoroch. Malé stroje sa budia cez krúžky, kartáče.[2]

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ ot/min} \quad (9)$$

Alternátory veľkých výkonov majú vysokú účinnosť až 98 %.

2.1.1 Vinutie statoru

Poznáme dva typy vinutí:

- a) Rozložené vinutie 1) Jednovrstvové
- 2) Dvojvrstvové
- b) Sústredené vinutie

a) Rozložené vinutie

Každá cievka potrebuje dve drážky (počet drážok stroja musí byť párny). Dvojvrstvové sa líši od jednovrstvového vinutia počtom cievkových strán nad sebou v drážke, ktoré sú tvorené hornou a dolnou stranou cievky. Vinutie musí byť súmerné vzhľadom na počet fáz, pólov a vetví. Vinutie slúži väčšinou k vytvoreniu točivého pola, pretože požadujeme sínusové priebehy ems, magnetickej indukcie a mmn, ktoré sa vzápätí transformujú na sínusové priebehy.

Návrh vinutia

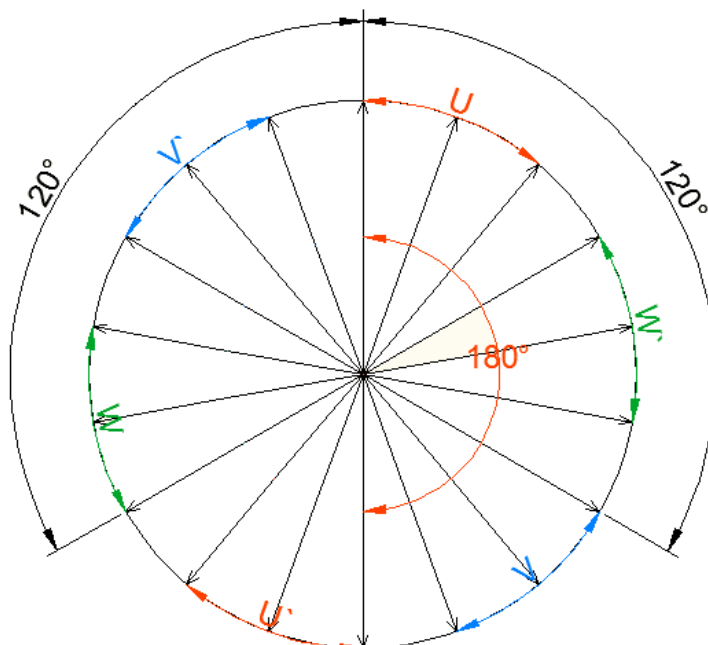
Základným pojmom je vzťah medzi elektrickým a mechanickým uhlom. Mechanický uhol vyjadruje reálnu stupňovú stupnicu či už na rotore alebo statore(kostra). α nám udáva posunutie medzi jednotlivými drážkami statora.

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi}{Q} = \frac{2 \cdot 180}{36} = 10^\circ \quad (10)$$

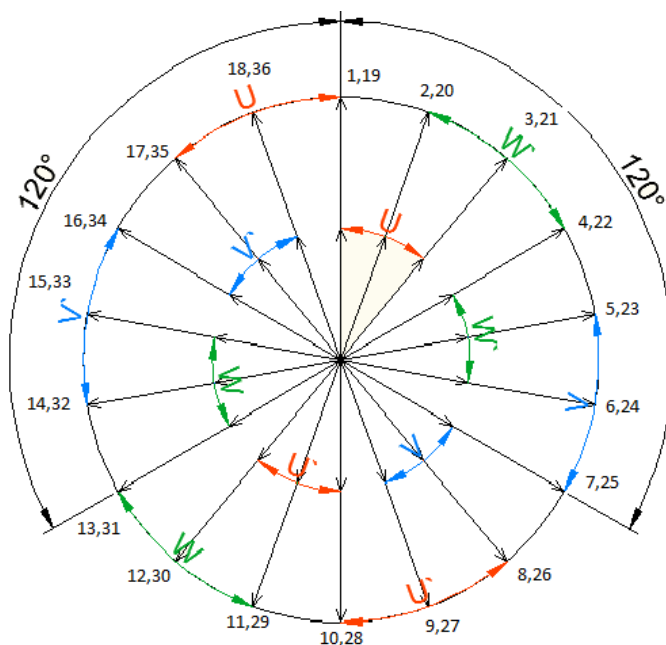
Elektrický uhol α_e je daný prepočtom v závislosti na počte pólových dvojíc stroja, aby sme vedeli zostrojiť správne zapojenie vinutia do drážok.

$$\alpha_e = p \cdot \alpha = 2 \cdot 10 = 20^\circ \quad (11)$$

Pomocou α_e vytvoríme vektorovú hviezdu vinutia viz. Obrázok 5, kde každý vektor predstavuje elektromotorickú silu.



Obrázok 4: Vektorová hviezda jednovrstvového vinutia s plným krokom



Obrázok 5: Vektorová hviezda dvojvrstvového vinutia $\alpha_e = 20^\circ$

Spájame drážky posunuté o 180° , pretože cievka sa skladá raz navinutá z jednej strany a druhej strany vinutej späť, takže sa nám “kompenzuje” 180° . Takto dosahuje cievka najväčšie napätie. U dvojvrstvového vinutia je uhol vždy blízky k 180° . Každý dvojpól obehne vektorová hviezda raz. Z vektorovej hviezdy určíme činiteľ vinutia. Je to pomer napätia vetvy

k aritmetickému súčtu napätí všetkých drážok vetvy. Pri návrhu statorového vinutia, si musíme určiť počet drážok na pól a fáz.

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3 \quad (12)$$

Napr. Jednovrstvové vinutie - fáza U (plný krok):drážky 1-10, 2-11,3-12,19-28,20-29,21-30.

Napr. Dvojvrstvové vinutie - fáza U (skrátенý krok):drážky 1-8, 2-9, 3-10, 19-26, 20- 27, 21-28,...

Takto rozložené vinutie do drážok, má za následok vznik sínusového trojfázového napätia. Nevýhoda jednovrstvového vinutia je nepotlačenie vyšších harmonických.

Čím je q väčšie, tým lepšie je priblíženie k sínusovke. Skrátенie kroku, má význam vtedy, aby druhé strany cievok mali elektromotorické sily iné časové fázy než predné strany. Dajme tomu, že $q=3$, tak predné strany cievok majú $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$. Pri neskrátенom kroku majú zadné strany $+180^\circ$, ale ako som spomínal, zapojením opačného smeru vinutia, kompenzujem 180° . Čiže nám ostanú pôvodné sily. Pre zlepšenie sínusového priebehu, získame ďalšie ems skrátením kroku na

$$y = \frac{2}{3} \cdot \tau_p = \frac{2}{3} \cdot 90 = 60^\circ \quad (13)$$

Záleží to na tvare magnetického poľa, ak je priebeh viac trojuholníkový, tak tým je treba krok viacej skrátit', aby sme dostali jasnejšiu sínusovku.[1]

Vyššie harmonické polia indukujú vo vinutí vyššie harmonické EMS. Harmonická γ -tého rádu má γ -krát väčšie vlnu, a teda γ -krát viac pólov.

$$\alpha_v = \gamma \cdot p \cdot \alpha \quad (14)$$

Činiteľ vinutia sa skladá z drážkových vektorov všetkých cievkových strán, ale pre zjednodušenie výpočtu ho rozkladáme na činiteľ pásma k_q a činiteľa skrátenia kroku k_y

$$k_v = k_r \cdot k_y \quad (15)$$

Pričom

$$k_r = \frac{\sin \frac{q \cdot \alpha}{2}}{q \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{(3 \cdot 10)}{2}}{3 \cdot \sin \frac{10}{2}} = 0,989 \quad (16)$$

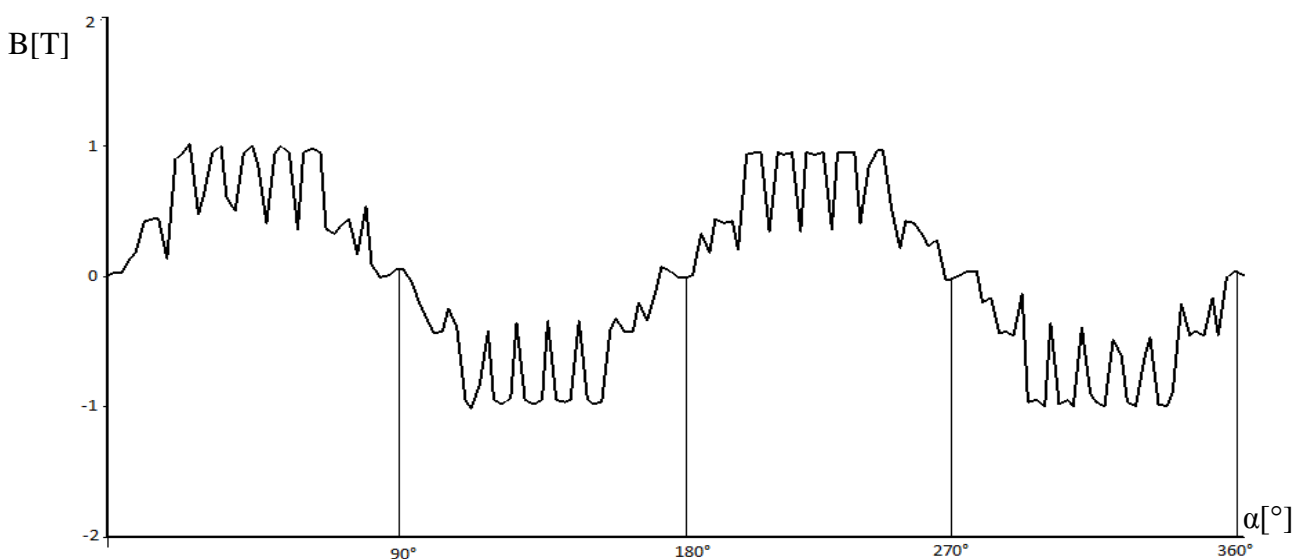
$$k_y = \sin \left(\frac{y \cdot \pi}{\tau_p \cdot 2} \right) = 1 \quad (y = \tau_p) \quad (17)$$

Činiteľ vinutia stačí určiť pre jednu cievku, pretože y sa nám nemení. Do činiteľa vinutia patrí aj činiteľ posunutia drážok, ak sú drážky natočené, čo ale nie je náš prípad.

Pri väčšom počte pólov sa používa na dosiahnutie sínusovky zmena zlomkového počtu drážok na pól a fáz v kombinácii s vhodným skráteným kroku.

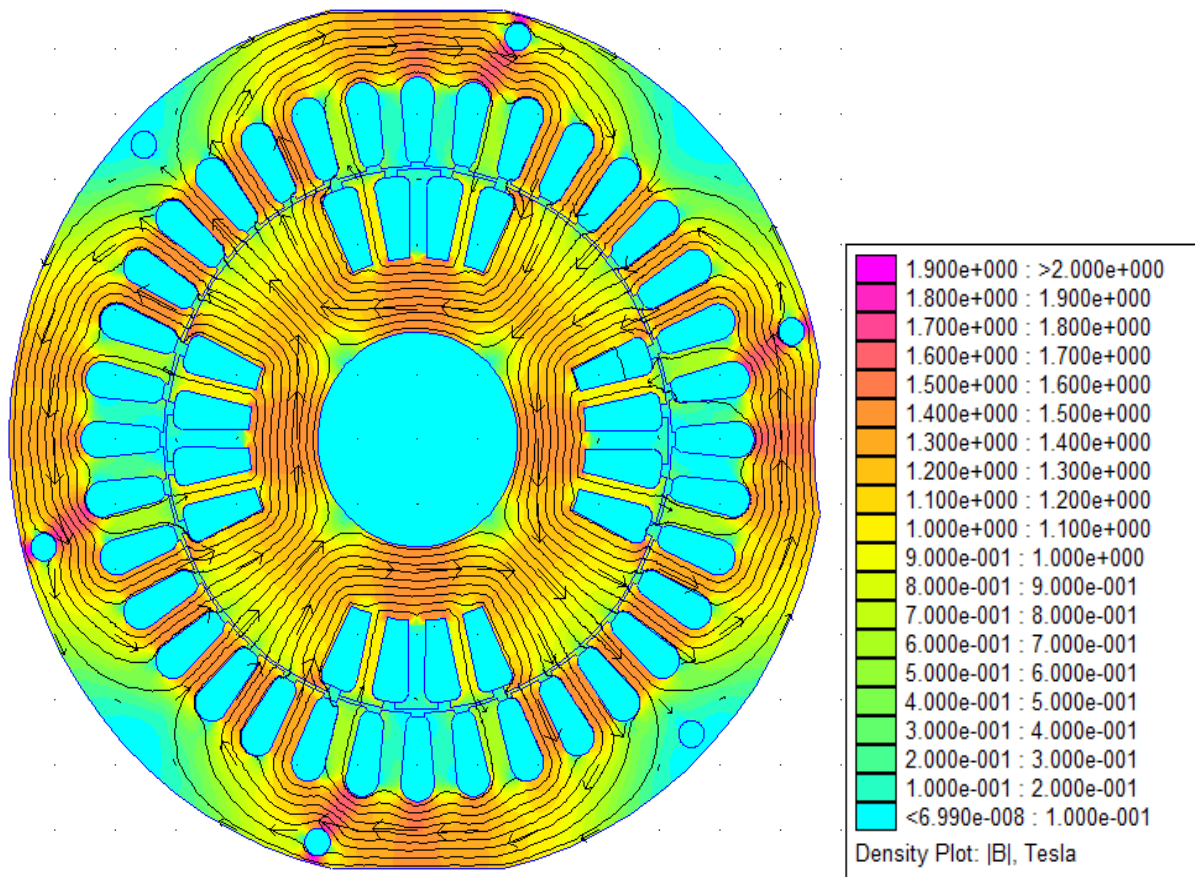
2.2 Magnetické pole stroja a jeho výpočet

Máme dve možnosti ako si poradiť s výpočtom magnetických polí. Ak vieme priestorové rozloženie mms, tak určujeme indukciu v danej časti stroja. Druhá možnosť je opačný prípad, stanovíme si indukciu v určitej časti stroja a dorátavame magnetické napätie. Taktiež si musíme uvedomiť, či počítame pre jeden pól, alebo pre jednu dvojicu. Pre presnosť výpočtu by sme mali voliť 2-3 čiary pola rôznych vzdialeností, tak aby prechádzali cez zuby a tam kde je indukcia maximálna. Ako príklad výpočtu si ukážeme stroj bez vyniklých pólov. Predpokladajme, že prúd preteká iba budiacim vinutím.



Obrázok 6: Magnetická indukcia vo vzduchovej medzere

Na Obrázok 6 je vidieť takmer sínusový priebeh indukcie vo vzduchovej medzere. Špičky “impulzov” sú zuby statora oproti pólu rotora. Poloha rotora je ukázaná na Obrázok 7.



Obrázok 7: Magnetický tok prechádzajúci strojom

Predpoklad:

Efektívna dĺžka stroja $l=100\text{mm}$ a predpokladáme hladký rotor $2p=4$ pričom $1/3$ rotoru je hladká a v $2/3$ sú drážky pre budiace vinutie. Stredná hodnota indukcie vo vzduchovej medzere medzi hladkým pólom a statorom $B_\delta=0,6\text{ T}$ a šírka vzduchovej medzery $\delta=0,5\text{mm}$. Za materiál statoru a rotoru si volím M700-50A, kde vďaka B-H charakteristike vieme zistiť intenzitu pola v danej časti MO. Celková potrebná MMS :

$$F_m = U_\delta + U_z + U_p + U_{js} + U_{jr}. \quad (18)$$

Začnime výpočtom vo vzduchovej medzere pre jednu pólovú dvojicu.

Predĺžená vzduchová medzera

$$\delta' = k_{c1} \cdot k_{c2} \cdot \delta = 0,68\text{ mm} \quad (19)$$

Carterov činiteľ k_c pre stator

$$k_{c1} = \frac{t_3}{t_3 + \delta - 0,75 \cdot b_3} = \frac{7,34}{7,34 + 0,5 - 0,75 \cdot 2,4} = 1,21 \quad (20)$$

Carterov činiteľ k_c pre rotor

$$k_{c2} = \frac{t_3}{t_3 + \delta - 0,75 \cdot b_3} = \frac{9,32}{9,32 + 0,5 - 0,75 \cdot 2} = 1,12 \quad (21)$$

Magnetické napätie pre vzduchovú medzeru

$$U_\delta = 2 \cdot 0,8 \cdot 10^6 \cdot B_\delta \delta' = 1,6 \cdot 10^6 \cdot 0,6 \cdot 0,068 = 652 \text{ A} \quad (22)$$

Magnetické napätie pre zub (statora), pričom predpokladaná indukcia v zube bude

$$B_z = B_\delta \cdot \frac{t_3}{0,9 \cdot l_z} = 0,6 \cdot \frac{7,34}{0,9 \cdot 3,72} = 1,33 \text{ T} \quad (23)$$

vd'aka ktorej viem $H_z = 254 \text{ Am}^{-1}$

$$U_z = 2 \cdot l_z \cdot H_z = 2 \cdot 0,012 \cdot 254 = 6,1 \text{ A} \quad (24)$$

Pri výpočte napätia v statore, môžeme uvažovať $l_{js} = \tau_p$, kde indukcie v tretinách jha statoru sú $B_{celk} = 1,5 \text{ T}$, v $2/3$ je 1 T a $1/3$ je $0,5 \text{ T}$ čiže z indukcií dostaneme strednú hodnotu intenzity poľa.

$$H_{js} = \frac{1}{3} \cdot (H_1 + H_2 + H_3) = \frac{(116 + 164 + 690)}{3} = 323,3 \text{ Am}^{-1} \quad (25)$$

Magnetické napätie jhu statora je rovné

$$U_{js} = l_{js} \cdot H_{js} = \frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot H_{js} = \frac{3,14 \cdot 0,084}{4} \cdot 323,3 = 21,32 \text{ A} \quad (26)$$

Pri jhu rotora si treba uvedomiť, že sytenie v jhu rotora je takmer rovnaké s jhom statora ($H_{js} = H_{jr}$).

$$U_{jr} = H_{jr} \cdot l_{jr} = 323,3 \cdot 0,0357 = 11,54 \text{ A} \quad (27)$$

Magnetické napätie pólu určíme celkovým prechádzajúcim magnetickým tokom, viz. Obrázok 3: Magnetický obvod stroja s vyniklými pólm.

Šírka pólu pri koreni $b_p=0,02153\text{m}$. B_p pri predpokladanom 10% rozptyle je

$$\Phi = B_\delta \cdot S_p = 0,6 \cdot \frac{49 \cdot \pi \cdot D \cdot l}{360} = 2,154 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (28)$$

$$B_p = \frac{1,1 \cdot \Phi}{2 \cdot b_p \cdot L_e} = \frac{1,1 \cdot 2,154 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,02153 \cdot 0,1} = 0,55 \text{ T} \quad (29)$$

$$U_p = l_p \cdot H_p = 0,0137 \cdot 164 = 2,25 \text{ A} \quad (30)$$

Celková potrebná MMS podľa (18)

$$F_m = U_\delta + U_z + U_p + U_{js} + U_{jr} = 652 + 6,1 + 21,32 + 11,54 + 2,25 = 693,21 \text{ A} \quad (31)$$

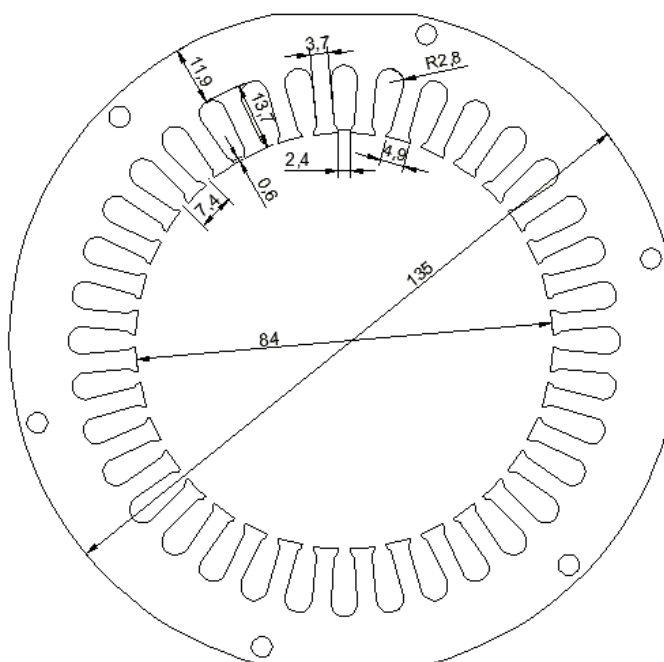
Hodnota strednej hodnoty indukcie vo vzduchovej medzere dosiahla približne 0,4-0,5 T.

2.3 Budenie synchrónneho stroja

Budenie je základným pilierom každého generátora. Vinutie budenia je umiestené v drážkach rotora stroja, ktoré je budené jednosmerným napätím privádzané cez krúžky. Úlohou budiaceho vinutia je vybudíť dostatočný magnetický tok. K vybudeniu príslušného magnetického toku, musíme zistiť magnetomotorickú silu, ktorá je daná súčtom magnetických napätí.

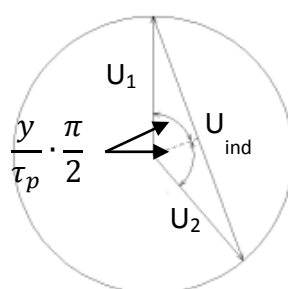
2.4 Rotor a stator

2.4.1 Stator stroja



Obrázok 8 Konštrukčné schéma statora

Stator (kotva) je u elektrických strojov miesto, kde sa pôsobením magnetického poľa indukuje požadované napätie bez ohľadu na to, či ide o stojaciu alebo otáčajúcu sa časť stroja. Indukované napätie vo vinutiach statora môžeme zistiť dvoma spôsobmi. Začnime tým, že si predstavme jeden závit v každej drážke, ako som vinutia fáz rozdelil podľa kapitoly 2.1.1. Pre pól natočený na drážky 4-6 a druhý severný pól o 180° platí, že prechádza cievkami U takmer plný magnetický tok viz. Obrázok 7: Magnetický tok prechádzajúci strojom.



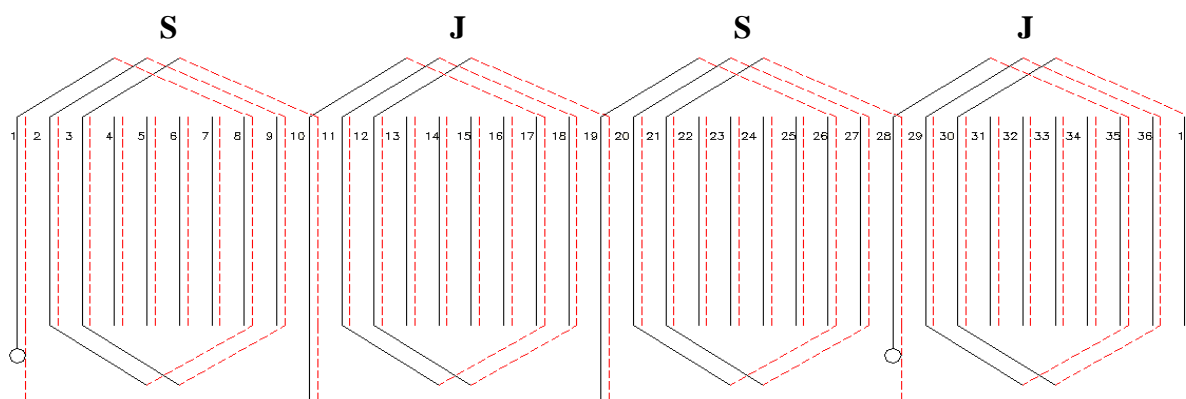
Obrázok 9 Napätie indukované v jednom závite ($y=7$)

Pri skrátenom kroku vinutia sa indukované sínusové napätie sčítava geometricky

$$U_{imax} = 2 \cdot U \cdot \sin \cdot \frac{y}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2} = 2 \cdot U \cdot k_y \quad (32)$$

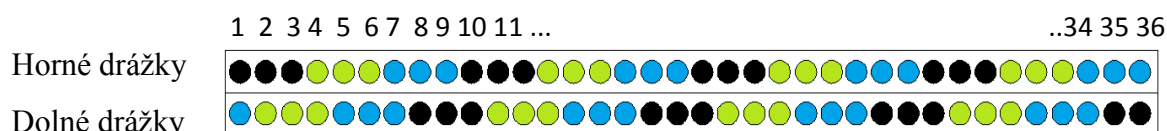
a pri plnom kroku sú napätia pre jeden závit posunuté o 0° a tak sa pre jednu drážku môže sčítať napätie $U_1 + U_2$.

Názornú ukážku dvojdrážkového vinutia máme na nasledujúcom obrázku. Pre jednoduchšie pochopenie zapojenia si predstavme, že sa jedná o 2 cievky navinuté zľava doprava (S) a ďalšie 2 cievky sprava doľava (J), pričom sú v sérii. Vo vodičoch sa indukuje napätie, ktoré geometricky sčítame a dostaneme indukované napätie na svorkách stroja.

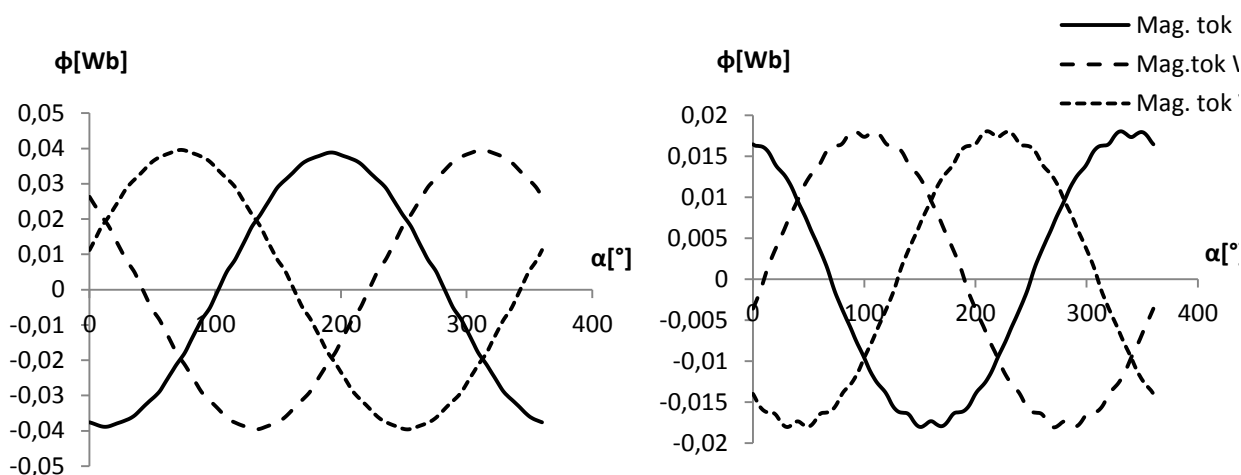


Obrázok 10: Ukážka vinutia kotvy pre fázu U ($y=7$)

Toto zapojenie som vytvoril pomocou tingleyovho schématu a vektorovej hviezdy.



Obrázok 11: Schéma zapojenia vinutí statoru (čierna U; zelená W; modrá V)



Obrázok 12: Sprážený magnetický tok vinutím statora

a) Priebek spráženého toku danými cievkami v statore b) Priebek spráženého toku cievkami prvého návrhu stroja v statore

1. Magnetický tok sprážený s vinutím má sínusový priebek. Maximálna hodnota spráženého simulovaného priebehu je $\Phi = 37,5$ mWb. Indukované napätie získam

$$u_i = \frac{d\Phi_s}{dt} \quad (33)$$

a sprážený tok je

$$\Phi_s = \Phi_{sm} \cdot \sin(\omega \cdot t) \Rightarrow u_i = \Phi_{sm} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \quad (34)$$

Ak $\cos \omega t = 1$ tak je $u_i = \max$

$$u_{im} = \Phi_{sm} \cdot \omega = \Phi_{sm} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad (35)$$

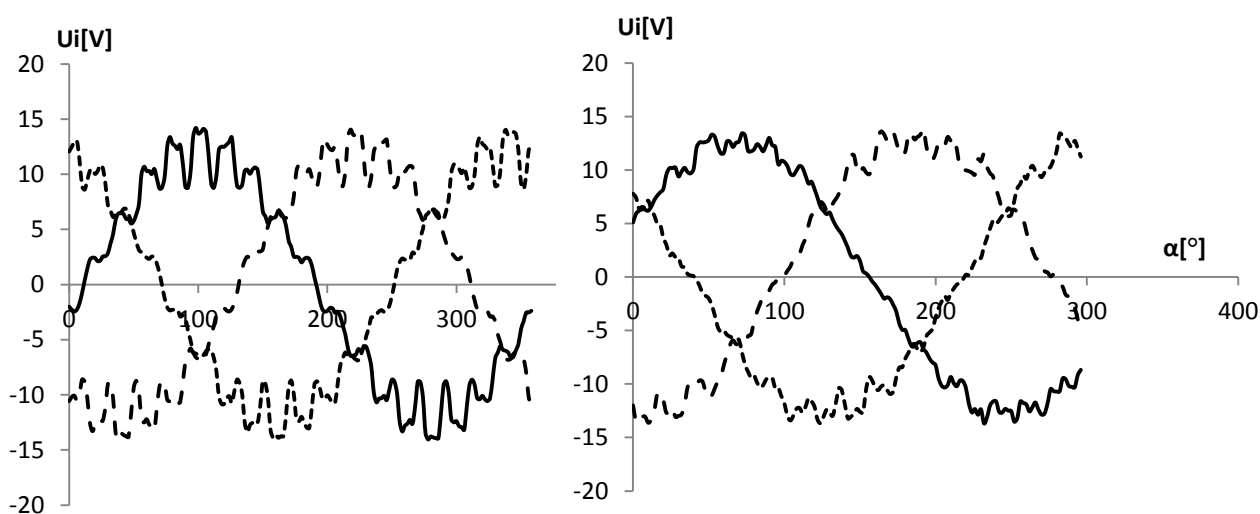
Efektívna hodnota indukovaného napätia (sprážený mag. tok už zahŕňa závit)

$$U_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Phi_s}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi_s = 4,44 \cdot 50 \cdot 37,5 \cdot 10^{-3} = 8,3 \text{ V} \quad (36)$$

Pre 12 závitov (2 x 6 závitov na fázu) dostaneme 8,22 V. Keďže potrebujeme $U_n = \frac{42}{\sqrt{3}} = 24,25$ V, trojčlenkou dostaneme potrebný počet závitov na fázu a to je 35,4=36 závitov/fázu. 3 závit na drážku jednej fázy.

Pre znázornenie priebehu indukovaného napätia v statorových cievkach viz. Obrázok 13, som použil statickú analýzu programu FEMM, ktorá spočívala v natáčaní rotora po 2° a zistení tokov danými cievkami. Z nasimulovaných hodnôt vieme graficky znázorniť a aj vypočítať indukované napätia. Pre výpočet sme použili vzorček (33), pričom $d\Phi_s$ = dvoma za sebou nameranými hodnotami a dt sme zistili jednoduchou trojčlenkou. Treba si uvedomiť, jedna otáčka je pri stroji s 25 ot/s = 0,04 s, ktorá odpovedá 2π .

$$\frac{0,04}{t} = \frac{2\pi}{\frac{1\pi}{180}} \Rightarrow t = \frac{0,017444 \cdot 0,04}{2\pi} = 1,111 \cdot 10^{-4} \text{ s} \quad (37)$$

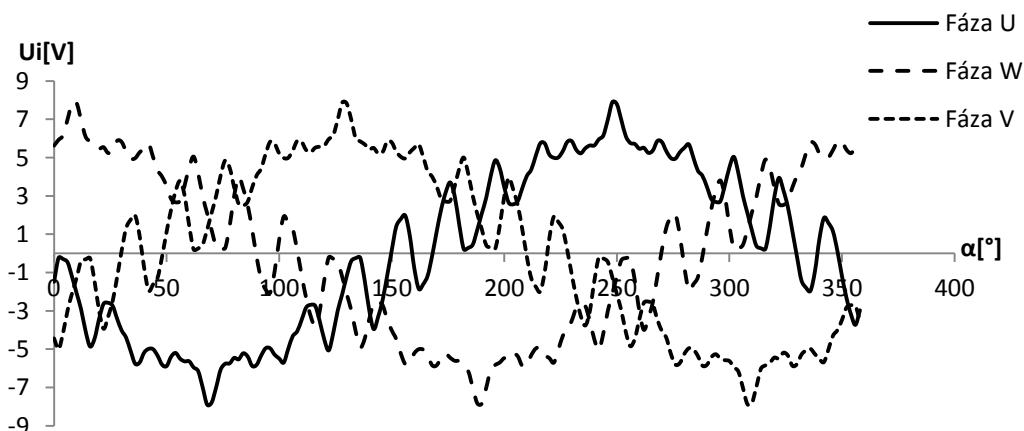


Obrázok 13: Priebehy indukovaných napätí

a) Indukované napätia v statorových cievkach (upravený stroj)

b) Upravené napätie nemagnetickými klinmi

a) Priebeh napätí má sinusový charakter a spôsobené kmity by sme mohli odstrániť klinmi v drážkach viz. nasledujúci obrázok b). Simulácia klinov bola zjednodušená pre názornú ukážku, inak by sa mali uskutočniť podrobnejšie analýzy.



Obrázok 14: Priebeh indukovaného napätia v cievkach prvého návrhu stroja

Tento prípad kmitov na sínusovke vznikol kvôli širokým drážkovým medzerám, čo malo za následok veľké zmeny magnetického toku a to sa prejavilo na napäťových skokoch.

2. Predbežný výpočet potrebných závitov pre získanie potrebného u_i

Plocha "pólu", ktorou predpokladáme sprážený magnetický tok

$$S_p = \frac{2 \cdot 49 \cdot \pi \cdot D \cdot l}{360} = 7,15 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (38)$$

Danú plochu vynásobíme predpokladanou indukciou vo vzduchovej medzere a získame hodnotu magnetického toku, ktorý indukuje napätie vo vinutiach. Pre zjednodušenie výpočtu predpokladajme univerzálnu strednú hodnotu indukcie vo vzduchovej medzere.

$$\Phi = B_{\delta u} \cdot S_p = 0,44 \cdot 7,15 \cdot 10^{-3} = 3,146 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (39)$$

Vzhľadom na to, že sa jedná o hladký rotor, musíme uvažovať aj zuby umiestnené vedľa pólu. Tok zubmi $\Phi_z = 0,1 \cdot 2 = 0,2 \text{ Wb}$.

$$U_i = \frac{2\pi f N \Phi k_r}{\sqrt{2}} \Rightarrow N = \frac{\frac{42}{\sqrt{3}}}{4,44 \cdot 50 \cdot (3,146 + 0,2) \cdot 10^{-3} \cdot 0,989} = 33 \text{ závitov} \quad (40)$$

Presnosť výpočtu je takmer totožná s nasimulovanými hodnotami. Predpokladajme zapojenie vinutia do hviezdy $U_n=42/24 \text{ V}$. $S=500 \text{ VA}$, takže

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{500}{\sqrt{3} \cdot 42} = 6,873 \text{ A} \quad (41)$$

Plocha jednej drážky je $S_d=5,886 \text{ m}^2$. Činiteľ plnenia uvažujeme $k_{cu}=0,6$. Takže vynásobením S_d a k_{cu} dostaneme čistý prierez vodiča medi.

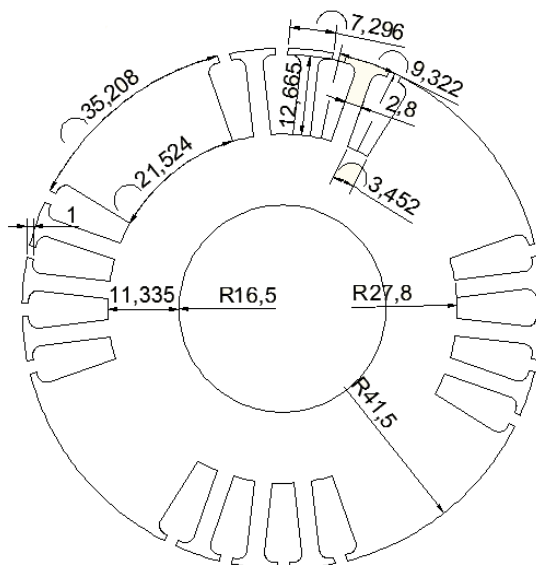
$$S_{cu} = S_d \cdot k_{cu} = 5,8865 \cdot 10^{-5} \cdot 0,6 = 3,532 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (42)$$

Ak dáme do drážky statoru 6 závitov, prúdovú hustotu môžeme rátať ako

$$J = \frac{N \cdot I_0}{S_{cu}} = \frac{6 \cdot 6,873}{35,32} = 1,167 \text{ A/mm}^2 \quad (43)$$

Z prúdovej hustoty môžeme usúdiť, že v drážkach máme dost miesta pre vinutie statora.

2.4.2 Rotor stroja



Obrázok 15 Konštrukčné schéma rotora

Rotor stroja obsahuje: budiace vinutie (drážky a zuby), hriadeľ, ktorý si zatiaľ odmyslíme a pokrytie pólov. V kap. 2.2 sme vyrátali potrebnú MMS, ktoré vytvára vinutie v drážkach rotora. Simulácia rotora mala pozitívne výsledky, prúdová hustota jednej drážky je prijateľná, pričom reluktančný moment bol takmer 0,38 N.m (pri alternátoroch sa uvažuje 0). Plocha drážky je $5,52033 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$, $k_{cu}=0,6$.

Takže plocha medeného vodiča v drážke je

$$S_{cu} = S_{dr} \cdot k_{cu} = 6,064 \cdot 10^{-5} \cdot 0,6 = 3,6384 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (44)$$

Na jednu drážku treba uvažovať ($I = 6 \text{ A}$, $N=30$)

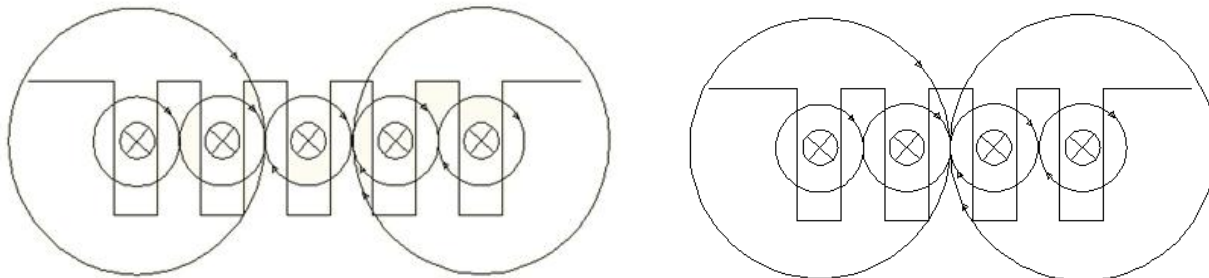
$$F_{md} = I \cdot N = 6 \cdot 30 = 180 \text{ A} \quad (45)$$

Takže prúdová hustota je

$$J = \frac{F_{md}}{S_{cu}} = 4,95 \text{ Amm}^{-2} \quad (46)$$

Musíme vziať do úvahy, že stroj sa bude pripájať do záťaže, kde stroj budeme regulovať budiacim prúdom a tak sa nám môže prúdová hustota zvýšiť na nepriaznivú hodnotu, pre ktorú by bolo treba zabezpečiť chladenie vinutia. Ďalšia možnosť ako predísť prehrievaniu vinutia sa nám ponúka v predošlej rovnici. Zväčšením plochy drážky, pokiaľ nám to konštrukcia rotora stroja dovoľí, dosiahneme zmenšenie J .

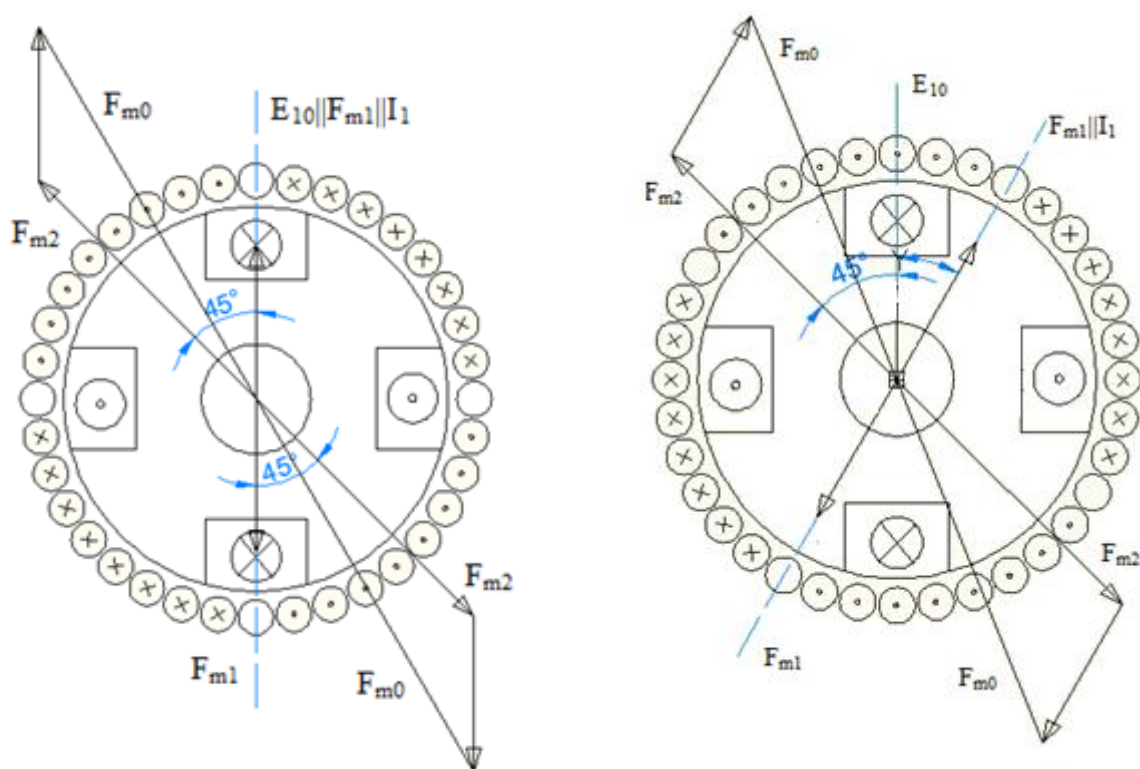
Na Obrázok 16 sú indukčné čiary, podľa ktorých môžeme vidieť, že druhým a tretím zubom sa budú uzatvárať malé magnetické toky, ktoré môžeme definovať ako rozptylové. Ak by sme ubrali jeden zub, tak by sa vzájomne pôsobiace siločiaru rušili.



Obrázok 16: Magnetické pole v drážkach rotorového vinutia

3 PRINCÍP A NÁHRADNÁ SCHÉMA

V sieti 50 Hz pracuje stroj pri otáčkach 3000,1500,1000,750 atď. min^{-1} . Ak nie je alternátor zaťažovaný (prúd statoru $I=0\text{A}$), dostávame charakteristiku naprázdno. Po nasýtení stúpa indukované napätie zvolna, pretože magnetický tok sa mení len veľmi málo. Pri zaťažení kotvy (uvažujeme súmernú trojfázovú impedanciu = fázové prúdy sú rovnaké a tak isto navzájom posunuté) vznikne pôsobením statorových prúdov magnetické pole, ktoré voláme reakcia kotvy ϕ_a . Fázami statora prúdia prúdy, ktoré rotáciou rotora vytvárajú točivé pole, prúdy majú natočenie fáz = posuvu zaťažovacích prúdov a vzniká kruhové pole s tokom ϕ_a , ktorý sa skladá s tokom ϕ_b do výsledného toku ϕ . To znamená, že MMS F_{m1} a I_1 sú vo fázy vtedy, keď prúd I_1 danej fázy má svoju maximálnu hodnotu, a zároveň bude v osi tej istej fázy maximum celkovej MMS statoru (F_{m1}). Na Obrázok 17 a) môžeme vidieť, že vektor E_{10} je vo fázi s I_1 . Na b) môžeme vidieť, že F_{m1} zaostáva za F_{m2} o $\frac{\pi}{2}$ (mechanických $45^\circ/90^\circ$ elektrických), čo je spôsobené orientáciou statorového prúdu, čo odbudzuje reakciu kotvy ($F_{m2} < F_{m0}$). To spôsobuje induktívna záťaž stroja, kde napätie klesá s porovnaním chodu naprázdno (kapacitná záťaž naopak). Taktiež sa môže stať, že I_1 prebehne EMS \Rightarrow že reakcia kotvy sa pribudzuje ($F_{m2} > F_{m0}$), tento stav je nebezpečný, pretože môže prísť k narušeniu izolačných vlastností.



Obrázok 17: Orientácia fázorov a vektorov MMS statoru a rotoru

a) prúd I_1 je vo fázi s EMS E_{10}

b) prúd I_1 je oneskorený za E_{10} o uhol $\varphi > 0^\circ$

Ako môžeme vidieť, pôsobenie MMS F_{m1} má značný vplyv na výslednú MMS stroja F_{m0} .

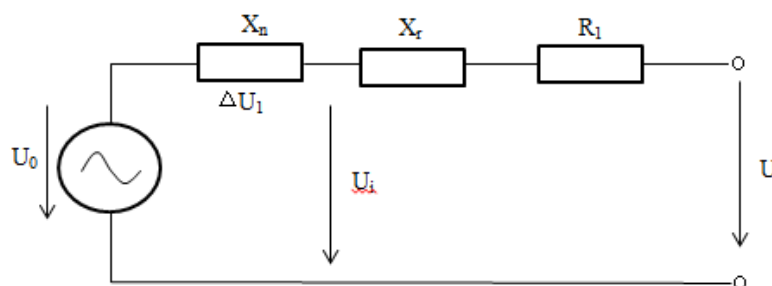
Vzhľadom k súmernému usporiadaniu stroja, môžeme odvodiť náhradné schéma len pre jednu fázu. Synchronný stroj s hladkým rotorom má rovnakú vzduchovú medzeru a tak môžeme predpokladať $X_d = X_q$. Napäťová rovnica je v tvare

$$U = R \cdot I + jX_d \cdot I + U_0 \quad (47)$$

Pre napäťovú rovnicu môžeme zostrojiť fázorový diagram a náhradné schéma viz. Obrázok 18

Celková reaktancia sa získa

$$X_d = X_n + X_r \quad (48)$$



Obrázok 18: Náhradná schéma synchronného stroja s hladkým rotorom

Reaktanciu pre jednu fázu zistím tak, že odpojím budiace napätie, fázu U napájam I_n a fázy W,V polovičným prúdom v opačnom smere. Takto dostaneme sprážený magnetický tok nabitý satorovým vinutím, z ktorého vypočítame indukčnosť fázy U

$$L_{1U} = \frac{\Phi_u}{I_n} = \frac{0,027}{6,873} = 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ H} \quad (49)$$

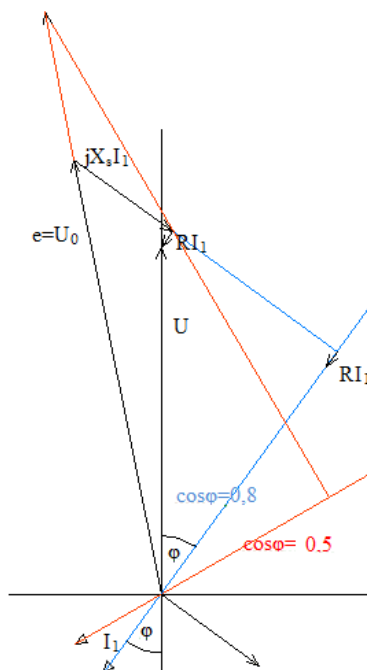
Celková reaktancia pre jednu fázu

$$X_d = \omega \cdot L_{1U} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{1U} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 3,93 \cdot 10^{-3} = 1,234 \Omega \quad (50)$$

Na nasledujúcom obrázku som znázornil priebehy zvolených účinníkov. Vzhľadom na zistené parametre stroja, vieme určiť U_0 podľa napäťovej rovnice, aby sme na výstupných svorkách stroja dostali $U=24,25 \text{ V}$.

$$U_0 = \sqrt{(-U \cdot \cos(\pi + \varphi) + RI)^2 + (-U \cdot \sin(\pi + \varphi) + X_d I)^2} = 31,05 \text{ V} \quad (51)$$

Vzhľadom na potrebné napätie U_0 , sa na prvý pohľad ponúka nasledujúce riešenie, musíme získať indukciou v statore cca 8 V, môžeme to dosiahnuť navinutím jedného závitú v statore vinutia, ale ako ukážu nasledujúce výpočty, tak to vôbec nie je pravda. Indukčnosť narastá kvadraticky s počtom závitov, takže U_0 nedosiahneme len tak zväčšením počtu závitov vo fázy.



Obrázok 19: Fázorový diagram alternátora s hladkým rotorom (modrá $\cos \varphi = 0,8$ (kap.); červená $\cos \varphi = 0,5$ (kap.))

Indukované napätie pri 48 závitoch $U = 33,2 \text{ V}$

($R=0,2774 \Omega$)

$$X_d = \omega \cdot L_{1U} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{1U} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 7,19 \cdot 10^{-3} = 2,26 \Omega \quad (52)$$

$$U_0 = \sqrt{(U \cdot \cos(\varphi) + RI)^2 + (U \cdot \sin(\varphi) + X_d I)^2} = 36,59 \text{ V} \quad (53)$$

Indukované napätie pri 60 závitoch $U = 41,5 \text{ V}$

($R=0,3468 \Omega$)

$$X_d = \omega \cdot L_{1U} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{1U} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 7,19 \cdot 10^{-3} = 3,55 \Omega \quad (54)$$

$$U_0 = \sqrt{(U \cdot \cos(\varphi) + RI)^2 + (U \cdot \sin(\varphi) + X_d I)^2} = 44,65 \text{ V} \quad (55)$$

Indukované napätie pri 120 závitoch $U = 82 \text{ V}$

($R=0,83232 \Omega$)

$$X_d = \omega \cdot L_{1U} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{1U} = 14,64 \Omega \quad (56)$$

$$U_0 = \sqrt{(U \cdot \cos(\varphi) + RI)^2 + (U \cdot \sin(\varphi) + X_d I)^2} = 114 \text{ V} \quad (57)$$

Tento problém treba riešiť buď a) predĺžením stroja, čím by sme zväčšili magnetický tok statorovými cievkami a straty stroja zostanú "takmer" nedotknuté b) zvýšením budiaceho prúdu I_b c) zmenou výstupných predpokladaných hodnôt stroja.

Daný problém riešime zvýšením MMS na $F_m=900 \text{ A}$ na pólovú dvojicu. Prúdová hustota vo vinutí rotora dosiahne $6,26 \text{ Amm}^{-2}$. Indukované napätie v 12 závitoch činí $8,8 \text{ V}$.

Indukované napätie pri 48 závitoch $U = 35,2 \text{ V}$

($R=0,2774 \Omega$)

$$X_d = \omega \cdot L_{1U} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{1U} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 7,19 \cdot 10^{-3} = 2,26 \Omega \quad (58)$$

$$U_0 = \sqrt{(U \cdot \cos(\varphi) + RI)^2 + (U \cdot \sin(\varphi) + X_d I)^2} = 36,59 \text{ V} \quad (59)$$

Je vidieť, že je nemožné dosiahnuť zadaných predpokladaných parametrov, ani vďaka zvýšenému budeniu. Jho statora dosiahlo $1,5\text{--}1,65 \text{ T}$, čo by sme mohli považovať za hraničnú hodnotu sytenia. Vzhľadom na toto obmedzenie, môžeme uvažovať o znížení daných predpokladov stroja: zdanlivý výkon stroja $S=430 \text{ VA}$. Tak by sme dostali $I_n=5,9 \text{ A}$; $\cos \varphi=0,8$; 48 závitov \Rightarrow indukované napätie $U=35,2 \text{ V}$; $U_0=34,92 \text{ V}$.

4 STRATY STROJA

V točivom stroji prebieha elektromechanická premena energie, ktorá sa uskutočňuje prostredníctvom magnetickej energie. Stroj má straty mechanického, ale aj magnetického charakteru.

4.1 Straty vo vinutí

Celkové straty dostaneme súčtom rotorových a satorových stratových výkonov.

$$P_{Cu} = P_{SCu} + P_{RCu} = 28,97 + 63 = 91,2 \text{ W} \quad (60)$$

Výpočet strát pre vinutie rotora

Celkovú dĺžku vinutia tvoria vinutia s kratším čelom 31,2 m a dlhším čelom 34,86 m = 66,06 m. Straty vinutia činia

$$P_{RCu} = R \cdot I_n^2 = \rho \cdot \frac{l_{r2}}{S_{Cu}} \cdot 7,5^2 = 0,017 \cdot 10^{-6} \frac{66,06}{1 \cdot 10^{-6}} \cdot 7,5^2 = 63 \text{ W} \quad (61)$$

Zníženie by sa dalo dosiahnuť vďaka väčšiemu počtu závitov a menším budiacim prúdom, ale nie je to ekonomickejšie.

Výpočet strát pre vinutie statora

Treba myslieť na to, že so stúpajúcou teplotou nám narastajú aj straty vo vinutí. Tieto straty je možné určiť z jednoduchého vzorčeka

Pri 20°C

$$P_{SCu} = R \cdot I_n^2 = 0,27744 \cdot 5,9^2 = 9,66 \text{ W} \quad (62)$$

Celkové straty vo vinutí statora sú $P_{SCu} = P_{Cu} \cdot 3 \cong 28,97 \text{ W}$.

Pri teplote vinutia 80°C sú straty

$$P_{SCu} = \rho \cdot \frac{I_n^2}{S_{Cu}^2} \cdot S_{Cu} \cdot l = \frac{10^{-6}}{48} \cdot \frac{5,9^2}{(1 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 16,32 = 11,8 \text{ W} \quad (63)$$

4.2 Straty v železe

Straty v železe určíme z tabuliek cogentu, jedná sa o plechy M700-50A. Uvádzajú straty pri 50 Hz, pre rôzne indukcie. Ako môžeme vidieť na Obrázok 7, indukcia sa pohybuje v statore okolo 1,5 T a tomu zodpovedá $p=5,68 \text{ W/Kg}$.

$$\Delta P_{Fe} = V_s \cdot \gamma \cdot p = 0,000642225 \cdot 7860 \cdot 5,68 = 28,67 \text{ W} \quad (64)$$

Straty v železe môžeme obmedziť orientovaným plechom, ktorý má až 3 krát menšie straty v železe a taktiež menší magnetizačný prúd. Pre výpočet strát sa používajú empiricky zistené činitele, pretože vznik vírivých strát sa ťažko matematicky vyjadří, keďže v elektrických strojoch sa takmer nevyskytuje homogénne magnetické pole (len v transformátoroch a jadrách pólov stroja), pretože sa väčšinou zhusťuje, poprípade ohýba atď., čo má za následok nárast strát, ktoré závisia od indukcie (B^2). Vzhľadom na jednosmerné budiace napájanie, môžeme tieto straty zanedbať pre rotor stroja, tieto straty vznikajú na základe striedavého magnetického poľa.

4.3 Mechanické straty

Empirické vzorce, kde činiteľ A uvažujeme 1,1 až 1,5 pre pomalobežné stroje a v je obvodová rýchlosť, D a L sú rozmery rotoru. Výpočet je uskutočnený iba približne. Na presné zmeranie mechanických strát by sme potrebovali uskutočniť merania.

$$P_m = A \cdot v^{2,5} \cdot D \cdot \sqrt{L} = 1,2 \cdot (6,55)^{2,5} \cdot 0,042 \cdot \sqrt{0,1} = 1,73 \text{ W} \quad (65)$$

4.4 Účinnosť stroja

Účinnosť synchronných strojov je vždy veľká. U strojov s $\cos\varphi=0,8$ sa dosahuje dobrých účinností. Účinnosť je skôr hospodárska otázka, pretože stroj s väčšími stratami je vždy lacnejší.

Celkové straty stroja sú

$$\Delta P = P_m + \Delta P_{Fe} + P_{Cu} = 1,73 + 28,67 + 91,97 = 122,37 \text{ W} \quad (66)$$

Účinnosť stroja

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P}{P_p} = \frac{P_p - \Delta P}{P_p} = \frac{P}{P + \Delta P} = 1 - \frac{\Delta P}{P_p} = 1 - \frac{\Delta P}{P + \Delta P} = 1 - \frac{\Delta P}{3 \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi + \Delta P} = \\ &= 1 - \frac{122,37}{3 \cdot 24,25 \cdot 5,9 \cdot 0,8 + 122,37} = 0,737 \end{aligned} \quad (67)$$

Súhrn parametrov alternátora

Zdanlivý výkon	$S=430$	VA
Menovité napätie	42/24,25	V
Menovitý prúd	5,9	A
Účinnosť stroja	73	%
Polové dvojice	2	-
Indukcia vo vzduchovej medzere	0,5	T

Rozmery rotora stroja-konštrukcia

Rozteč drážok	$t_3=9,322$	mm	11°
Šírka zuba	$b_z=2,5$	mm	-
Šírka drážky	$b_3=2$	mm	-
Šírka pólu	$b_p=35,208$	mm	49°
Šírka jha	$b_j=11,335$	mm	-
Dĺžka pólu v koreni	$b_{pk}=21,524$	mm	44°
Dĺžka vzduchovej medzere	$\delta=0,5$	mm	-

Vinutie rotora

Počet drážok	16
Počet vodičov v 1 drážke	30

Rozmery statora stroja-konštrukcia

Rozteč drážok	$t_3=7,42$	mm
Šírka zuba	$b_z=3,716$	mm
Šírka drážky	$b_3=2,4$	mm
Šírka jha	$b_j=11,85$	mm

Vinutie statora

Počet drážok	36
Celkový počet vodičov v 1 drážke	8
Počet vodičov 1 fázy v drážke	4

5 ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo navrhnúť alternátor a analyzovať jednotlivé problematiky, ktoré sú jeho súčasťou.

Práca oboznámi čitateľa s princípmi magnetických dejov, ktoré sa odohrávajú v točivých strojoch a s popísanou výpočtovou metódou konečných prvkov(MKP) v programe FEMM. Návrh stroja začína viz. popis v kapitole 2.2., pri upravovaní návrhu som porušil pravidlo 1/3 pól a 2/3 drážky vinutia rotoru kôli jednoduchšej regulácii reluktančného momentu, ktorý by mal byť nulový. Taktiež sme touto zmenou dosiahli počet štyroch drážok pre vinutie rotora, čím došlo k zníženiu rozptylového toku viz. Obrázok 16, vďaka čomu sa dosiahne lepšie využitie magnetického obvodu a taktiež sa bude praktickejšie umiestňovať vinutie do párneho počtu drážok. Návrh pokračoval voľbou vinutia statora, kde bolo cieľom porovnať rôzne možné zapojenia vinutia cievok. Zvolil som dvojvrstvé vinutie so skráteným krokom, pretože potlačíme vyššie harmonické a v statore máme zapojené štyri cievky v sérii, čím dosiahneme väčšie indukované napätie pre jednu periodu. Návrh rotora by sa dal vylepšiť zredukovaním reluktančného momentu $0,38\text{N.m}$ na nulu a podrobnými simuláciami s umiestnenými klínmi v drážkach. Kotva indukuje sinusové napätie viz. Obrázok 13, môžeme vidieť, že daný priebeh má sinusový charakter, s ktorým sa dá pracovať ďalej.

V predposlednej kapitole sa venujem dôležitej časti analýzy a tou je náhradné schéma a jeho fázorový diagram. Vďaka vypočítaným náhradným parametrom môžeme zistiť potrebné indukované napätie a zároveň je to odrazový mostík pre reguláciu alternátorového chodu. Výpočet reaktancie stroja je vcelku náročný. Musíme uvažovať vplyv jednotlivých a vzájomných indukčností. Indukčnosť som zistil pomocou programu FEMM, ktorá znepríjemnila dosiahnutie potrebného indukovaného napätia. Indukčnosť cievok v statore kvadraticky stúpa s pridávajúcim sa počtom závitov, pričom indukované napätie stúpa lineárne. Indukované napätie určujem zo vzorčeka (36). Najpraktickejšie riešenie by bolo predĺžiť stroj, s čím sa taktiež zvýši sprážený tok cievkami a dosiahneme vyššie indukované napätie pri rovnakom počte závitov na cievke. Taktiež sa nám ponúka druhá alternatíva, ktorá spočíva v rozšírení drážok rotora, tým by sme získali možnosť zvýšiť budenie, pretože rotor nieje tak nasýtený ako stator. Na druhú stranu nám ale vzrastú straty v rotorovom vinutí a taktiež by opäť bolo nutné naísť nové rozmiestnenie zubov rotora, aby sme dosiahli čo najmenší reluktančný moment, čiže návrh by opätovne podliehal mnohým upravám. Vzhľadom na hraničné sýtenie statora, znížime predpokladané parametre stroja. Zdanlivý výkon z 500 VA \rightarrow 430 VA , zachováme $\cos\varphi=0,8$ a $U_s=42\text{ V}$. Toto sú parametre, ktoré je schopný navrhnutý alternátor ponúknuť.

Na konci opisujem vzniknuté straty v elektrických strojoch a taktiež som spísal súhrnné parametre stroja.

LITERATÚRA

- [1] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. 714 s.
- [2] KLEPL, Václav. *Základní kvalifikační učebnice: elektrotechnika silnoprůdů*. Praha : [s.n.], 1971. Magnetický obvod, s. 208.
- [3] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 2 : Asynchronní stroje - synchronní stroje*. 2. opravené a doplnené vydání. Moskva : Energija, 1963. 722 s.
- [4] SUCHÁNEK, Vladimír. *Silnoprůdů elektrotechnika v automatizaci*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1980. 335 s.
- [5] MICHAILIDIS, P. *Analyza způsobu zakončení statorového a rotorového svazku synchronních strojů pomocí MKP*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 94 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Miroslav Skalka.
- [6] MĚŘIČKA, Jiří; HAMATA, Václav; VOŽENÍLEK, Petr. *Elektrické stroje*. Praha : ČVUT, 1994. 311 s.

PRÍLOHY

1. KONŠTRUKCIA ROTORU

2. KONŠTRUKCIA STATORU

3. CD

1 2 3 4

A

A

B

B

C

C

D

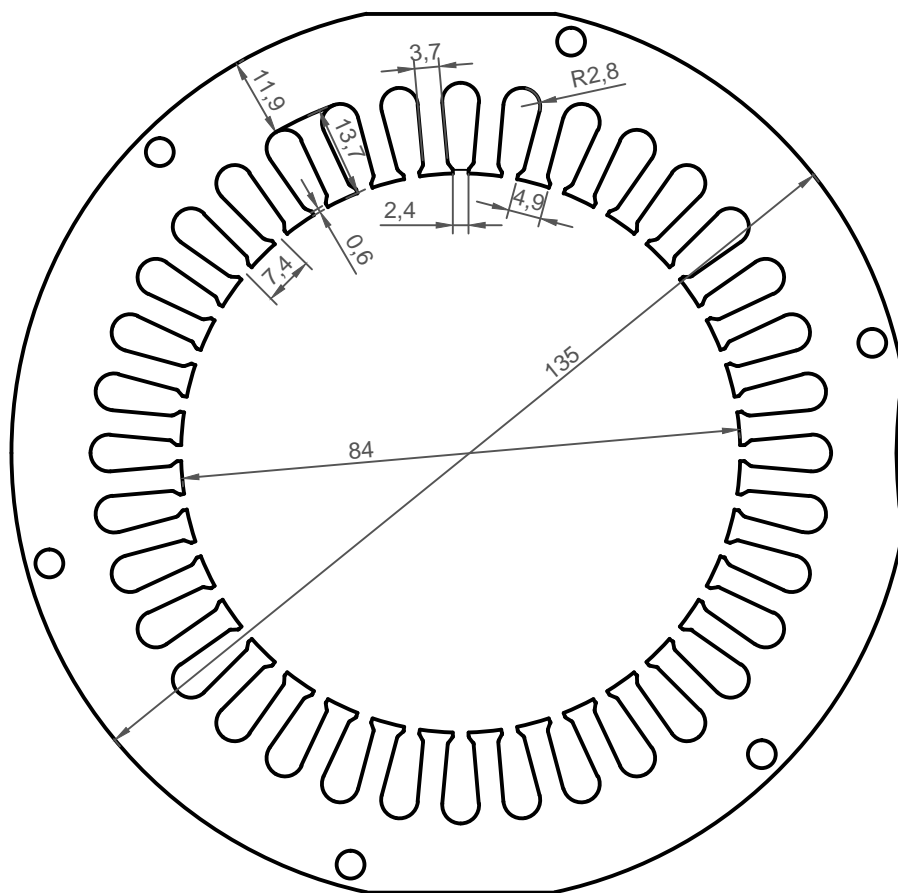
D

E

E

F

F



JMÉNO SOUBORU UVĚE FEKT VUT	Konštrukcia statoru	LIST 2	MĚŘÍTKO 1:1
KRESLIL Ondrej Šulák		ČÍSLO VÝKRESU 2	
SCHV.			

1 4